

面向作战实验分析的 智能集成仿真元 建模方法

汤健 田福庆 贾美英 孙春来 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

面向作战实验分析的智能集成 仿真元建模方法

汤 健 田福庆 贾美英 孙春来 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书依据军事复杂对抗系统的作战效能与作战实验关键因子间存在的难以用精确数学模型描述的非线性映射关系,采用数据驱动的基于智能集成仿真元建模的方法,重点解决军事对抗系统难以采用简化的数据驱动模型进行描述、对军事对抗系统进行作战实验分析的时效性和鲁棒性有待提高、现有数据驱动仿真元模型的预测外推性性能弱和稳定性差,以及作战实验关键因子间存在的冗余性和互补性难以量化分析等难题。本书详细叙述了面向作战实验分析的智能集成仿真元建模技术及其应用现状,系统介绍与分析了国外典型军事作战模拟仿真系统,提出了基于智能集成仿真元模型的作战实验探索性分析策略,着重进行面向作战实验分析的智能集成仿真元建模方法的研究,立足于研究较为通用的面向军事复杂系统动态漂移特性的智能集成仿真元建模技术。本书通过合成数据、Benchmark 数据以及作战实验数据验证了所提方法的有效性。

本书可为进行作战实验分析评估、装备作战仿真、作战仿真理论与实践等研究的研究人员提供参考,也适用于基于数据驱动建模的机械、化工、能源、食品等行业的科技人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

面向作战实验分析的智能集成仿真元建模方法 / 汤健等著.

—北京:国防工业出版社,2018.11

ISBN 978-7-118-11680-9

I. ①面… II. ①汤… III. ①作战模拟—计算机仿真
IV. ①E83-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 242843 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市天利华印刷装订有限公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16½ 字数 379 千字

2018 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

基于体系与体系对抗的信息化战争是典型的具有动态性和不确定性等因素的军事复杂系统。模拟仿真技术已经成为新形势下分析作战的重要手段，具有体系性、动态性、交互性、精确性等鲜明特点，能够为全方位、深层次、综合性的军事复杂系统分析提供科学方法和先进信息技术手段支持。研究表明，军事复杂系统仿真是对军事学科发展和实验研究的补充，是实战化训练中与指挥信息系统实现互操作的不可或缺的重要组成部分。

基于模拟仿真的探索性分析技术是可对具有动态性和不确定性等特性的军事复杂系统进行有效分析的一种方法。这种基于仿真的探索性分析方法需要利用计算机探索大量的可能作战想定空间，通过仿真过程数据的挖掘分析对各种不确定要素产生的结果进行整体研究。采用该技术进行作战分析需要3个步骤：

(1) 根据军事复杂系统能力评价体系，在策略空间、能力指标空间、环境空间中确定关键要素（变量）和这些要素（变量）的水平数，采用能够提高军事复杂系统分析参数覆盖空间、降低实验消耗的优化设计等技术减少分析样本空间的规模。

(2) 依据实验设计方案批次生成军事复杂系统想定脚本，并行运行多个仿真系统实例并存储相关推演过程数据。

(3) 对模拟仿真产生的海量过程数据进行挖掘，分析军事复杂系统的关键要素、薄弱点及其效能。

这是个大样本空间问题，对计算资源和智力资源的需求量巨大；通常借助高性能计算资源历时数天甚至数周进行作战实验，分析评估过程也需要大量耗费军事领域专家的时间和智力资源。可见，上述基于模拟仿真软件的信息化战争探索性分析难以满足决策者对战场态势信息的时效性需求并达到先知的目的，难以适应战场态势的动态变化。在针对紧迫形势或某些特殊情况下需要“即时”（Just in time）获取推演分析结果或得到最佳军事复杂系统配置参数时，更是难以实现。

仿真元模型通过采集复杂物理模型的实验数据建模获得，反映了复杂物理模型的输入/输出关系。仿真元建模技术为分析和认知不同种类复杂系统的设计、分析及优化等各种实际问题提供了统一框架。传统仿真元建模方法在结构上缺乏物理机理的有效支持，基于简化因果关系构建的主动元模型在一定程度上克服了这一缺点。通过总结专家经验提炼知识规则构建模糊推理模型在理论上是可行的，但受困于军事系统的复杂度和专家认知的差异性、主观性，较难实现。在专家知识规则难以获得的情况下，较为有效的解决方案之一是进行“知识获取自动化”，即从已有数据中提取有物理含义的知识规则。这些获取的知识规则的合理性和完备性需要军事领域专家辅助确定。智能集成仿真元建模技术进一步提升了模型预测性能的稳定性和可靠性。采用智能集成仿真元模型体系对复杂模拟仿真系统进行替代运行可满足作战实验分析的时效性需求。采用离线构建的智能集成仿真元模型体系替代模拟仿真系统进行推演分析，仅能在战场态势维持不变的“稳

态阶段”满足军事复杂系统分析评估的时效性和稳健性需求，难以自适应地跟踪军事复杂系统固有的动态时变特性。因此，仿真元模型需要通过实时更新和在线修正才能自适应地满足作战态势的不确定性动态变化。

针对上述问题，本书在国家自然科学基金项目（61573364, 61703087）和博士后特别资助项目（2015T81082）的支持下，根据军事复杂系统分析的时效性和先知性需求，借鉴国内外作战实验分析和数据驱动软测量技术与方法，以区域有限规模作战为应用背景，进行面向作战实验分析的智能集成仿真元建模研究。主要内容归纳如下：

（1）综述作战模拟仿真、作战实验的国内外现状，对与仿真元建模相关的技术和国内外作战实验探索性分析的现状进行总结，明晰了作战实验分析所面临的实际困难。

（2）系统介绍与分析国外典型的军事作战模拟仿真系统。

（3）提出基于智能集成仿真元模型的作战实验探索性分析框架和分析流程，以及基于仿运行优化与反馈控制视角的军事复杂系统高时效推演分析方案。

（4）提出基于选择性集成学习算法的仿真元建模技术，包括基于潜变量特征提取和选择性集成核随机神经网络神经网络仿真元模型、基于特征提取和选择性集成模糊推理的仿真元建模、基于智能集成的仿真元建模、基于智能更新样本识别算法的在线集成核随机神经网络仿真元模型，以及基于双层遗传算法优化的选择性集成核偏最小二乘仿真元建模方法，并对所提方法进行仿真验证。

（5）以有限规模空战的作战实验为例，进行基于模拟仿真软件的作战实验设计、进行实验实施和多类别仿真元模型的构建，并基于所构建的不同类型的仿真元模型进行有限规模空战中单因素的可视化分析。

本书和本领域中还有许多问题值得我们去挖掘和完善，展望如下：

（1）未研究基于模拟仿真系统进行仿真元模型的在线更新问题和进行基于 Matlab GUI 的人机交互界面开发，需要在后续工作中逐步完善。

（2）真正意义上的可用仿真元模型体系需要面向具体问题针对性的深化和细化，并且需要相关计算资源和人力资源的有效支撑。

（3）面对具体的军事模拟仿真系统，智能集成仿真元模型需要对军事领域专家知识进行进一步的融合，以便不断完善和达到实用化。

本书是在作者人生经历的转折阶段完成的。感谢伴随本书所做科研过程中的众多经历，感谢在此阶段中伴我成长、促我成长的同事！感谢及感激之情尽在难以表述的文字之外，意会之中！

本书中，田福庆主笔撰写了第1章中的作战模拟仿真和作战实验章节，贾美英撰写了本书的第2章，汤健撰写了本书的其他章节。此外，田福庆、贾美英和孙春来对全书进行了校阅和修订。

感谢北京工业大学在本书出版过程中给予的支持。

由于作者学识和水平有限，时间也甚是紧迫，虽然尽力而为，但仍难免会有不妥和错误之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2018年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 作战模拟仿真	3
1.2.1 基于数学模型的方法	3
1.2.2 基于多 Agent 的方法	4
1.2.3 基于复杂网络的方法	7
1.3 作战实验	8
1.3.1 作战实验的基本内涵	8
1.3.2 作战实验的基本类型	10
1.3.3 作战实验的基本特征	12
1.3.4 作战实验的作用与意义	13
1.4 仿真元建模	14
1.4.1 仿真元建模与数据驱动软测量	14
1.4.2 模型输入维数约简	16
1.4.3 神经网络集成建模理论	18
1.4.4 选择性集成建模	20
1.4.5 混合集成建模	22
1.4.6 模型在线更新	23
1.5 作战实验探索性分析	25
1.5.1 模拟仿真与探索性分析技术	25
1.5.2 在线辅助决策支持技术	27
1.6 本章小结	27
第 2 章 国外典型军事作战模拟仿真系统	28
2.1 作战模拟系统演变过程	28
2.1.1 萌芽阶段	28
2.1.2 兵棋阶段	28
2.1.3 现代作战模拟诞生阶段	30
2.1.4 现代作战模拟发展阶段	32
2.1.5 现代作战模拟整合阶段	33
2.2 作战模拟系统分类、层级及实现方式	36
2.2.1 作战模拟分类	36

2.2.2	作战模拟分层	36
2.2.3	作战模拟的实现方式	37
2.3	联合战区级仿真系统 (JTLS)	38
2.3.1	系统概况	38
2.3.2	系统功能	41
2.3.3	系统结构	43
2.4	联合作战系统 (JWARS)	47
2.4.1	系统概况	47
2.4.2	系统功能	49
2.4.3	系统结构	51
2.5	扩展防空仿真系统 (EADSIM)	55
2.5.1	系统概况	55
2.5.2	系统功能	57
2.5.3	系统结构	60
2.6	兰德战略评估系统 (RSAS)	68
2.7	本章小结	70
第 3 章	基于智能集成仿真元模型的作战实验探索性分析	71
3.1	引言	71
3.2	分析框架	71
3.2.1	实验设计	73
3.2.2	仿真数据生成	74
3.2.3	仿真结果分析	77
3.2.4	综合展示	78
3.2.5	分析支撑系统	78
3.3	分析流程	79
3.4	基于运行优化与控制视角的分析方案	81
3.4.1	基于仿反馈控制的军事复杂系统高时效推演分析	82
3.4.2	军事复杂系统基础回路控制层优化敏捷配置	83
3.4.3	军事复杂系统运行优化控制层分析目标动态评价	83
3.5	本章小结	84
第 4 章	基于选择性集成学习的仿真元建模技术	85
4.1	基于潜在特征提取的选择性集成核随机神经网络仿真元模型	85
4.1.1	引言	85
4.1.2	相关方法描述	86
4.1.3	建模策略	91
4.1.4	算法实现	92
4.1.5	算法步骤	94
4.1.6	仿真验证	95

4.1.7	本节小结	97
4.2	基于多核潜在特征提取的选择性集成模糊推理仿真元建模	97
4.2.1	引言	97
4.2.2	相关方法描述	98
4.2.3	建模策略	102
4.2.4	算法实现	102
4.2.5	算法步骤	108
4.2.6	仿真验证	108
4.2.7	本节小结	115
4.3	基于多核潜在特征提取的智能集成仿真元建模	116
4.3.1	引言	116
4.3.2	建模策略	116
4.3.3	算法实现	117
4.3.4	算法步骤	121
4.3.5	仿真验证	121
4.3.6	小结	124
4.4	基于智能更新样本识别的在线集成核随机神经网络仿真元模型	124
4.4.1	引言	124
4.4.2	在线更新样本识别相关方法描述	126
4.4.3	递推偏最小二乘算法	133
4.4.4	在线自适应加权融合(AWF)算法	133
4.4.5	建模策略	134
4.4.6	算法实现	136
4.4.7	仿真验证	141
4.4.8	本节小结	151
4.5	基于双层遗传算法优化的选择性集成核偏最小二乘仿真元建模方法	151
4.5.1	引言	151
4.5.2	建模策略	152
4.5.3	算法实现	155
4.5.4	仿真结果	159
4.5.5	本节小结	167
4.6	本章小结	167
第5章	基于仿真元模型的有限区域空战作战实验分析	168
5.1	引言	168
5.2	实验数据获取	168
5.2.1	空战实验设计	168
5.2.2	空战模拟仿真	202
5.2.3	空战数据处理	202

5.3 区域空战仿真元模型	203
5.3.1 离线仿真元模型构建	204
5.3.2 在线仿真元模型构建	222
5.4 基于离线仿真元模型的单因素作战效能分析	225
5.4.1 数据生成	225
5.4.2 可视化结果	227
5.4.3 对比分析	242
5.5 本章小结	243
参考文献	244

第1章 绪 论

1.1 引 言

基于体系与体系对抗的信息化战争是典型的具有动态性和不确定性等因素的军事复杂系统。模拟仿真在社会、经济、战争等复杂系统的设计、开发、性能评估过程中广泛应用。研究表明,军事复杂系统仿真是对军事学科发展和实验研究的补充^[1],是实战化训练中与指挥信息系统实现互操作的不可或缺的重要组成^[2,3]。军事复杂系统的模拟仿真往往需要建立大量不同层次、不同分辨率的模型,需要底层仿真为高层仿真提供数据和模型支持。仿真模型复杂程度的提高和仿真规模的扩大,导致精确性与运行效率之间的矛盾增大,同时也增加了高层决策者认知系统行为的难度。

探索性分析技术是对军事复杂系统进行分析评估的有效方法。探索性分析能够对各种不确定要素产生的结果进行整体研究。基于仿真的探索性分析方法需要利用计算机探索各种可能的作战想定空间,通过仿真过程数据的挖掘分析对各种不确定要素产生的结果进行整体研究。采用该技术进行军事复杂系统推演分析需要:

(1) 实验设计:根据军事复杂系统能力评价体系,在策略空间、能力指标空间、环境空间中确定关键因素(变量)和这些因素(变量)的水平数,采用能够提高军事复杂系统分析参数覆盖空间、降低实验消耗的优化实验设计等技术减少分析样本空间的规模。

(2) 多样本模拟仿真:依据实验设计方案批次生成军事复杂系统想定脚本,并行运行多个仿真系统实例并存储相关仿真过程数据(虚拟大数据)。

(3) 分析评估:对模拟仿真产生的大量仿真过程数据(虚拟大数据)进行挖掘,分析军事复杂系统的关键要素、薄弱点及其效能。

这是个大大样本空间问题,对计算资源和智力资源的需求量巨大;通常借助高性能计算资源历时数天甚至数周进行作战实验^[4],分析评估过程也需要大量耗费军事领域专家的时间和智力。可见,上述基于模拟仿真软件的信息化战争探索性分析难以满足决策者对战场态势信息的时效性需求并达到先知预警的目的,难以适应战场态势的动态变化。在针对紧迫形势或某些特殊情况下需要“即时”(Just in time)获取仿真分析结果或得到最佳军事复杂系统配置参数时,更是难以实现。因此,进行军事复杂系统自适应高时效仿真分析的研究,对提供军事复杂系统的高质量 and 专业化智慧产品意义重大。

采用低分辨率模型有助于提高对战略层次的分析能力和决策者对军事复杂系统的认知能力,同时也是对复杂系统的固有不确定性进行探索性分析的需要;但通常我们难以直接建模得到有效的低分辨率简化模型,这一问题促使了人们对仿真元模型的研究。仿真元模型作为军事复杂系统模拟仿真模型的简化代理模型,通过采集模拟仿真系统的输

入/输出数据建模获得。基于仿真元模型，高层决策者更易获得底层模型的数据支持和更易理解复杂军事系统行为，也可通过对高维不确定空间的探索降低模型的输入维数，并可作为低层仿真和高层仿真之间的聚合机制^[5]。研究仿真元模型在军事复杂系统分析中的应用具有重要的实用价值。

传统仿真元建模方法在结构上缺乏物理机理的有效支持，基于简化因果关系构建的主动元模型在一定程度上克服了这一缺点。基于支持向量机（SVM）的主动元模型更适合于小样本数据建模^[6]。集成学习机制的引入，更进一步强化了仿真元模型的泛化能力^[7]。这类数据驱动模型虽能较好地拟合训练数据所蕴含模式，但逻辑推理和外推性能差。从另外一个角度讲，军事复杂系统的输入和输出间往往存在模糊性的映射关系；模拟仿真的结果通常需要借助军事领域专家提炼相关规则，并依据众多相关信息进行决策。显然，领域专家的“人脑模型”具有较强推理能力。通过总结专家经验，提炼知识规则构建模糊推理模型在理论上是可行的，但受困于军事系统的复杂度和专家认知的差异性与主观性，较难实现。在专家知识规则难以得到的情况下有效的解决方案之一是实现“知识获取自动化”^[8]，即从已有数据中提取有物理含义的知识规则。这些获取的知识规则的合理性和完备性由军事领域专家确定。基于知识规则的模糊推理模型具备较强的推理能力，但其学习和模式识别能力较弱。显然，可以对数据和知识驱动两类模型进行有效融合以实现优化的集成互补。

事实上，军事复杂系统的分析评估是一个连续的动态过程，包括掌握信息、提出目标、研究设计备选方案、评选备选方案、实施方案、评审方案、取得反馈信息和进行方案修正等步骤，同时需要根据战场态势进行目标修订。基于智能集成仿真元模型的军事复杂系统推演分析过程是包括实验设计、模型运行、分析评估、分析目标动态评价等功能的闭环分析过程。从另外一个视角，其本质上是控制学科反馈控制的闭环过程；在给定分析目标时，寻优军事复杂系统效能的过程也是快速配置最佳实验设计参数的过程。因此，如何从运行控制的视角描述军事复杂系统的推演分析过程，如何利用众多成熟运行控制参数寻优策略实现军事复杂系统的优化敏捷配置，是进行军事复杂系统高时效推演分析的难点。显然，基于运行优化控制的视角，进行军事复杂系统的高时效推演分析的研究具有重要理论与现实意义。

采用离线构建的智能集成仿真元模型替代模拟仿真系统进行推演分析仅能在战场态势维持不变的“稳态阶段”满足军事复杂系统推演分析的时效性和稳健性需要，难以自适应跟踪军事复杂系统固有的动态时变特性。对离线构建的智能集成仿真元模型进行实时更新和在线修正是必要的；这需要模拟仿真系统的支持。在某些情况下，决策部门也需要关注模拟仿真过程的内部细节。显然，采用智能集成仿真元模型完全替代模拟仿真系统是不合实际需求的。如何基于专家经验智能识别仿真元模型是否需要更新，如何有效耦合模拟仿真系统与智能集成仿真元模型并进行无扰动切换，以及如何基于在线集成学习算法提升军事复杂系统高时效推演分析的自适应性是待解决的难点问题。

综上，军事复杂系统的自适应高时效推演分析面临着巨大挑战：

(1) 如何借鉴现有技术构建具有较强泛化能力、融合仿真过程数据和领域专家知识的智能集成仿真元模型，以期获得具有较强稳健性、解释性和逻辑性的预测结果，为高时效的军事复杂系统推演分析提供可靠的模型依据。

(2) 如何从反馈控制的视角对基于智能集成仿真元模型的推演分析过程进行重新定义和描述,如何借鉴运行优化与控制理论的研究成果进行军事复杂系统的优化敏捷配置,实现高时效推演分析。

(3) 如何智能识别军事复杂系统的动态时变特性,如何利用在线学习算法对智能集成仿真元模型进行更新以实现军事复杂系统动态时变特性的自适应。

综上,面对军事复杂系统推演分析的时效性和先知性需求,我们将本书所面对的问题归结为一类基于智能集成仿真元模型和仿反馈控制的军事复杂系统高时效推演分析的自适应难题。

限于作者知识水平和有限精力,本书仅对部分内容予以研究。

1.2 作战模拟仿真

国内外作战建模仿真主要遵循两条技术路线:一条是基于数学建模的传统路线,即先获取作战系统宏观参量之间的定量关系后再仿真,揭示这些宏观量的演化轨迹与路线,对战局与结果作出解释与预测;另一条是基于复杂系统理论构建微观主体的自适应与进化模型,从主体交互呈现的宏观模式中揭示隐含的微观机制,对战争的演化趋势与行为作出解释与推测。近年来,还出现了运用复杂网络对作战系统拓扑结构进行分析和解释的相关研究。

1.2.1 基于数学模型的方法

目前,国内外基于数学模型的方法在作战仿真领域是主流。联合作战层次的作战模拟仿真系统以美国为代表,包括联合仿真系统(JSIMS)、联合作战系统(JWARS)、联合分析系统(JAS)、联合建模与仿真系统(JMASS)、扩展型防空仿真系统(EADSIM)、联合战区仿真系统(JTLS)、联合冲突战术仿真(JCATS)、战术仿真系统(WARSIM)等^[9]。国内及其他国家在仿真支撑环境的核心技术与美国存在差距,在建模方面没有本质上的差异。受限于模型结构,这类系统对作战过程中的指挥与控制(C²)、情报、信息的价值与作用表现不足^[10,11],难以从本质上予以解决。

1.2.1.1 确定性模型

确定性模型是对一个系统完整、封闭式的表示和规范。确定性建模中存在的最普遍的假设是聚合与解聚。聚合假设是指在精细尺度上的复杂交互完全可以通过对细节行为进行“平均”,从而聚合出它们的整体效果,进而在一个更粗的粒度上进行表示。解聚假设是指粗粒度上的参数能够被还原为多个细粒度、小型的、能够明确区分的局部行为。聚合、解聚假设可以应用于性能参数、作战环境条件和局部战术行为。

确定性建模的第三个假设是规则性,即对象系统的各参量之间的关系可以通过显式的确定表达出来,局部参量值小的改变不直接带来整体巨大的非线性效果。

指挥、控制、情报及作战对抗过程通常不在确定性模型中进行显式表示,而是采用模型中项与项之间的数学关系或者是通过过程的关系序列的策略进行表现。

1.2.1.2 随机性模型

随机性模型除包含类似于确定性模型的聚合、解聚和规则性假设外,还有如下三个

附加假设：

- (1) 有些输入数据必须是随机变量。
- (2) 大部分过程能够被建模为彼此独立的事件或简单的因果链。
- (3) 独立随机变量的输出分布是非“偏斜”的，进行较少的模型运行次数可“消去”随机变量的方差并产生统计收敛性。

随机性模型表达 C^2 的方法与表示作战过程“损耗”的方法类似，都是使用服从某一分布的随机变量表示。如，美国“反潜战仿真系统 (ASW)”对于 C^2 的建模过程是：服从于某一指定概率分布的随机变量决定一个潜艇能否被一支水面舰艇的声纳探测，经随机模拟若结果是“被发现”，则舰艇状态调整为“跟踪”；在跟踪过程中若发现潜艇消失，声纳初始探测概率分布则重新被执行。

美军目前仍在使用的 JAS 的数学模型，主要都是上述两类，如图 1.1 所示。

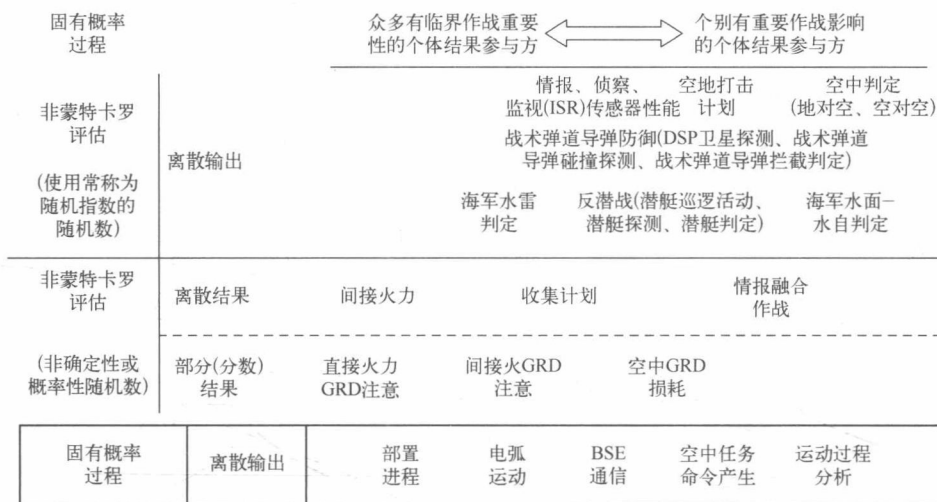


图 1.1 美国 JAS 仿真系统使用的数学模型

目前国内外作战仿真用于描述地面作战与空战损耗过程的 Lanchester 方程反映的是工业时代战争的特点，其假设一方的损耗率正比于对方的兵力规模与射击速率的乘积。目前，美国战区级地面和空中作战的战术作战 (TACWAR) 等仿真系统仍然使用该模型描述兵力损耗。反映导弹战损耗的“齐射模型”是对 Lanchester 方程的改进，把连续损耗假设改正为“脉冲式”离散过程。

目前随机性模型主要用于表示反潜与防空，如美国作战仿真系统中的海军仿真系统 (NSS)。

1.2.2 基于多 Agent 的方法

以复杂适应系统 (CAS) 理论为指导，基于 Agent 的作战模拟仿真取得了大量成果并且前景较好。

1.2.2.1 仿真系统

目前，代表性系统有 ISSAC (美国)、EINSTcin (美国)、MANA (新西兰)、Socrates (美国)、Bacto Wars (澳大利亚)、Archimedes/Pythagoras (美国)、WISDOM I 和 WISDOM

II (澳大利亚) 和 CROCADILE (澳大利亚) 等^[12]。这些系统的共同特点是：仿真对象的层次比较低（班、排、连）、各 Agent 之间通过简单的交互“突现”战术层次的部分集体行动（迂回、穿插、突破）。主要性能参数对比如表 1.1 所列。

表 1.1 基于主体的复杂适应作战仿真系统能力对比

特征	ISSAS	EINSTEIN	MANA	CROCADILE	Bacto Wars
运行时间	快	快	快	中	慢
程序	C++	C++	Delphi	JAVA	JAVA
容易设置	慢, 无用户界面	快, 用户友好型图形界面			
领域	仅用于不可通过性物体	通过性, 不可通过性, 多达 3 个用户确定的领域	弹子台, 好处理的墙、灌木丛、山顶	陆地、水域和空中	用户确定的领域
多个时间序列运行模式	否	是	是	是	是
交互式仿真	是	是	是	否	未知
嵌入式可视化工具	否	是	是	否	未知
参数空间开发	是通过 MHPCC	是	有限	否	否
个性变化	是	是	多触发器	否	否
C ² 结构	3 层	3 层	3.0.37 版本中无 C ² 结构	用户定义	否
态势感知图	否	否	是	否	否
通信	基于个体	基于班排	基于班排, 有大量参数	广播	未知
路径	只有最终目标	只有最终目标	一套用户自定义路径	只有最终目标	只有最终目标
运动算法	吸引/排斥加权体系				
代理架构	反应代理架构				

以上系统不能支持体系对抗层次为大规模联合作战行为的建模与仿真。

1.2.2.2 仿真平台

文献[13]评估了基于 Agent 进行作战仿真的主流平台, 包括通用平台 (Swarm、NetLogo、MASON、Repast) 和专用平台 (EINSTEIN、WISDOM-II、MANA、Bacto Wars)。从平台易用性、速度、适应性、自织、网络因果性、文档、柔性、分析能力共八个方面给出的量化标准如表 1.2 所列, 上述八个平台对复杂系统研究能力的量化评估结果如表 1.3~表 1.5 所列。

表 1.2 基于主题复杂仿真平台的评估标准

领域	差 (分值 1)	好 (2)	优秀 (3)
灵活性	单一算法/可变参数多算法	可变参数多种算法	用户定义算法
文件	简洁/不存在实例, 许多理论/功能无文件	合理实例, 大部分理论/功能有文件	可用实例的大部分理论/功能有文件, 有助于用户社区使用 (邮件/网络论坛)
设施	有限数据记录	基础数据记录	可扩展数据记录和绘图
分析能力	计算一些变量的平均值	支持基础统计理论 (平均数, 标准偏差等)	支持高级统计理论 (dostroniton 类检查)
速度	屏幕刷新时间 (数秒)	偶然间断下运行/降低 ≥ 20 代理	屏幕运行良好/具有批量模式
适应性	仅作反应	随代理属性进展	随代理属性进展, 包括学习属性
自组性	基础代理聚集能力 (在代理之间反馈)	在代理和环境及其他代理之间反馈	多级反馈
网络因果性	间接通信/因果影响对项目的通信	基于信息线性组合 (加权和) 的代理	代理受基于接收信息的非线性模式影响

表 1.3 各平台评估结果 1

软件	开源	灵活性	速度	文件	设施	分析
Bacto Wars	Yes	3	2	2	2	1
EINStein	No	1	3	2	3	2
MANA	No	1	2	3	1	1
MASON	Yes	3	3	2	3	2
NetLogo	No	3	3	3	3	2
Repast	Yes	3	3	3	3	2
Swarm	Yes	3	2	2	3	2
WISDOM-II	No	1	1	1	2	2

表 1.4 各平台评估结果 2

软件	适应性	自组性	网络因果性
Bacto Wars	1	2	3
EINStein	1	3	2
MANA	1	1	0
MASON	3	2	3
NetLogo	2	3	1
Repast	2	2	3
Swarm	1	3	1
WISDOM-II	2	3	3

表 1.5 各平台评估结果 3

软件平台	可用性	对 CS&CAS 适用性	适用性与均衡性	总分
Bacto Wars	10	6	12	22
EINStein	11	6	12	23
MANA	8	2	4	12
MASON	13	8	16	29
NetLogo	14	6	12	26
Repast	14	7	14	28
Swarm	12	5	10	22
WISDOM-II	7	8	16	23

1.2.2.3 建模方法

以 Agent 的 CongiveAgent (BDI) 模型、Reactive Agent (Condition Action) 模型、Hybrid Agent (混合 Agent) 模型三种方法为基础, ISAAC、EINStein、MANA 和 CROCADILE 等系统的 Agent 行为决策机制是通过“个性权向量”(Personality Weight Vector) 以及相应的元规则 (Meta-Rule) 实现的, 如图 1.2 所示。

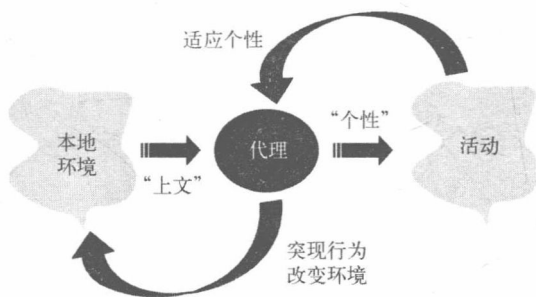


图 1.2 基于“个性权向量”Agent 行为建模

1.2.3 基于复杂网络的方法

目前，复杂网络研究所涉及的范围已经包括物理、生物、社会、军事等各研究领域。比较有影响的主要是 Jeffery R.Cares（美国）的作战复杂网络模型研究。

Jeffery R.Cares 作战网络模型是静态模型，其分析工具是连接矩阵，评估指标是连接矩阵特征值，其作战节点（Node）分为 Sensor（传感器）、Decider（决策者）、Influencer（施效器）、Target（目标）四类，节点有属方（Sides）（如代表红方、蓝方、中立方、友方）属性，节点之间的连接（Links）包括信息传输和各种能量（如火力）交互。

在此基础上，构建出的作战网络包括简单作战网络（图 1.3）、简单双方对抗作战网络（图 1.4）、简单完全交互双方对抗作战网络（图 1.5）。

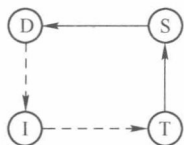


图 1.3 简单作战网络

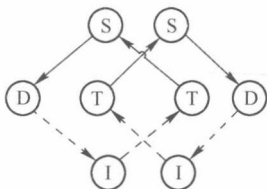


图 1.4 简单双方对抗作战网络

进一步，提出控制环（图 1.6）、自催化控制环（图 1.7）、自催化竞争环（图 1.8）、作战环（图 1.9）的概念。

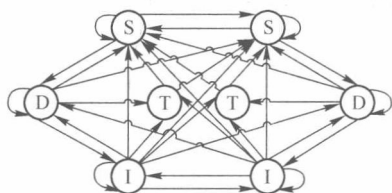


图 1.5 简单完全交互双方对抗作战网络

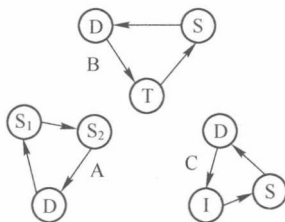


图 1.6 控制环

其中，A、B、C 表示三种不同类型的控制环，下标 X、Y 指的是两种不同的作战节点。

基于上述分析，形成对抗网络连接矩阵，如图 1.10 所示。

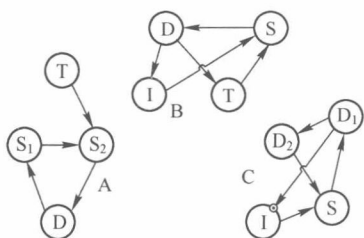


图 1.7 自催化控制环

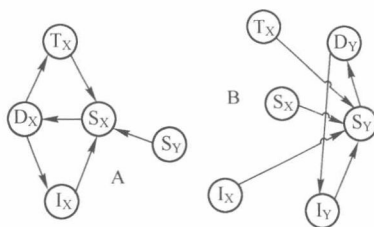


图 1.8 自催化竞争环

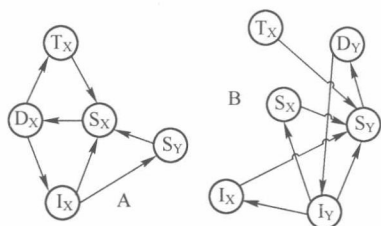


图 1.9 作战环

	S	D	I	T	S	D	I	T
S	1	1	0	0	1	0	0	0
D	1	1	1	1	1	0	0	0
I	1	1	1	1	1	1	1	1
T	1	0	0	0	1	0	0	0
S	1	0	0	0	1	1	0	0
D	1	0	0	0	1	1	1	1
I	1	1	1	1	1	1	1	1
T	1	0	0	0	1	0	0	0

图 1.10 对抗网络连接矩阵

无环网络、单一简单环和自催化环等类型网络结构及其连接矩阵特征值分别如图 1.11~图 1.13 所示。

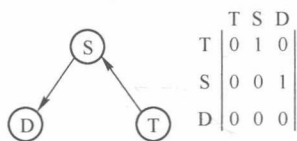


图 1.11 无环网络及其连接矩阵特征值

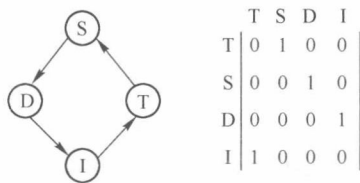


图 1.12 单一简单环及其连接矩阵特征值

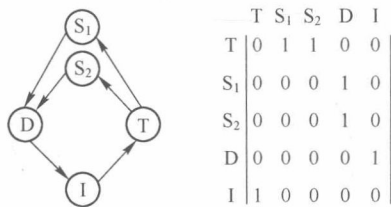


图 1.13 自催化环及其连接矩阵特征值

1.3 作战实验

1.3.1 作战实验的基本内涵

1.3.1.1 作战实验的基本概念

1946年,美国运筹学者莫尔斯(P. M. Morse)和金鲍尔(G. E. Kimball)提出作战实